

氏 名	堀 出 朋 哉
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2889 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 材 料 工 学 専 攻
学位論文題目	Influence of the nanostructures on quantized vortex behavior in REBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-x</sub> (RE = Y, Gd) films (REBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-x</sub> (RE = Y, Gd) 薄膜中のナノ構造が量子化磁束の挙動に及ぼす影響)
論文調査委員	(主 査) 教 授 田 中 功 教 授 中 村 裕 之 教 授 落 合 庄 治 郎

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、ナノ構造を制御したREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (RE = Y, Gd) 薄膜の超伝導特性を評価することにより、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> テープ線材中での量子化磁束の挙動および特性決定因子を明らかにした成果をまとめたものであり、6章からなっている。

第1章は序論であり、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>のテープ線材応用の現状と課題を紹介している。REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> テープ線材において、ナノ組織制御を行うことにより量子化磁束の挙動が制御され、高い特性が実現されてきた。しかしREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> テープ線材は複雑な組織を有するために、その特性決定因子は明確にはなっていない。さらなる線材特性向上と超伝導現象理解のためにREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> テープ線材のナノ構造が量子化磁束の挙動に及ぼす影響を明らかにすることが必要であるとし、これを本論文の目的としている。

第2章では結晶粒界が量子化磁束の挙動に及ぼす影響を議論している。バイクリスタル基板を用いることにより小傾角粒界を導入したYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> 薄膜で、電流密度-電圧特性と臨界電流密度を測定することにより、小傾角粒界での量子化磁束の構造と臨界電流密度決定機構を明らかにしている。粒界傾角を変化させると、磁束の構造がAbrikosov 磁束、Abrikosov Josephson 磁束、Josephson 磁束と変化していくことを示している。粒界に存在する磁束がAbrikosov 磁束のときは、高密度に存在する粒界転位がピンニングセンターとして働くため、粒界は薄膜の臨界電流密度を減少させないことを示している。また粒界に存在する磁束がAbrikosov Josephson磁束のとき、低磁場では磁束フローにより臨界電流密度が決まるが、高磁場ではJosephson 接合現象により臨界電流密度が決まることを明らかにしている。さらにJosephson 磁束が存在する粒界では磁場によらずJosephson 接合現象により臨界電流密度が決められることを示している。REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> テープ線材で高い臨界電流密度を実現するには、Abrikosov 磁束が存在する角度範囲に粒界傾角を減少させなければならないと示唆している。

第3章では磁束ピンニングセンターのピンニング力、空間分布、形状が磁束グラス-液体転移に与える影響について議論している。YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> 薄膜において、ピンニングセンターのピンニング力、形状、空間分布を制御する方法を提案している。この系において磁束グラス-液体転移の振る舞いを調べることにより、臨界指数決定因子およびグラス-液体転移温度が最も高くなる系を明らかにしている。ピンニング力が増加したり、等方的な形状のピンニングセンターが特定の方向に整列したりしても、グラス-液体転移の臨界指数は変化しないが、ピンニングセンターの形状や空間分布の異方性が変化すると臨界指数が変化することを示している。また最も高いグラス-液体転移温度をもつのは薄膜表面法線方向に線状にのびたピンニングセンターが存在する系であることを示している。

第4章ではナノロッドの磁束ピンニング特性を議論している。金ナノロッドを導入したGdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> 薄膜で超伝導特性を評価することにより、ナノロッドの密度と量子化磁束密度が一致する磁場（マッチング磁場）が量子化磁束の振る舞いに及ぼす影響を明らかにしている。低温では、マッチング磁場以下の磁場領域は臨界電流密度が磁場にほとんど依存しない単

一磁束ピンニング領域であるのに対し、マッチング磁場以上の磁場領域は磁束間弾性相互作用が支配的となり臨界電流密度が磁場の増加とともに減少するせん断ピンニング領域であることを示している。一方、温度を上げると、マッチング磁場以下の磁場では、臨界電流密度は磁場の増加に対して緩やかに減少するが、マッチング磁場以上の高磁場では臨界電流密度は急激に減少することを実験的に明らかにしている。さらに高温の領域では、マッチング磁場で不可逆温度が磁場に対し急激に減少しはじめることを示している。このようにどの温度領域においても、マッチング磁場よりも高磁場側ではナノロッドの磁束ピンニング特性が弱まることを示している。ナノロッドによって高磁場におけるREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜の臨界電流密度を上昇させるには、ナノロッドの密度を十分に大きくする必要があると示唆している。

第5章では、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜中に粒界と粒内ピンニングセンターが共存したときの臨界電流密度決定機構を議論している。単結晶基板上に成膜した薄膜と単一粒界を導入した薄膜の臨界電流密度特性を比較することにより、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜中に粒界が存在するとき、低磁場では粒界での量子化磁束の挙動が、高磁場では粒内の量子化磁束の挙動が臨界電流密度を決定していることを示している。さらに単一粒界を導入した薄膜と単一粒界と粒内ピンニングセンターをとともに導入した薄膜の臨界電流密度特性を比較することにより、粒界が存在するYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜への粒内ピンニングセンターの導入は、高磁場のみで臨界電流密度上昇に有効であることを示している。このように粒界が存在するYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>テープ線材に粒内ピンニングセンターを導入することにより臨界電流密度を上昇させるには、粒内磁束が臨界電流密度を支配する領域を広げることが重要であると示唆している。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、ナノ構造を制御したREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (RE=Y, Gd) 薄膜の超伝導特性評価を行うことにより、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> テープ線材における量子化磁束の挙動および特性決定因子を明らかにした成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 小傾角粒界を導入したYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜において、超伝導特性が評価された。YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜で小傾角粒界の傾角を変化させると磁束の構造がAbrikosov磁束、Abrikosov Josephson磁束、Josephson磁束と変化し、粒界での臨界電流密度はこれら3種の量子化磁束の挙動によって決まっていることが示された。

2. ピンニングセンターのピンニング力、形状、空間分布を制御したYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜において磁束グラス-液体転移の振る舞いが評価された。磁束グラス-液体転移の臨界指数を決定しているのはピンニングセンターの形状や空間分布の異方性であることが示された。

3. ナノロッドが存在するGdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜において、ナノロッドの密度と量子化磁束の密度が一致する磁場（マッチング磁場）で量子化磁束の振る舞いが大きく変化することが観察された。マッチング磁場以下の磁場では、ナノロッドは非常に有効な磁束ピンニングセンターとなることが示された。

4. 粒内ピンニングセンターと粒界が制御されたYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜の超伝導特性が評価された。YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜中に粒界が存在するとき、低磁場では粒界に存在する量子化磁束の挙動が臨界電流密度を決定するため、粒界が存在する薄膜への粒内ピンニングセンターの導入は、高磁場のみにおいて臨界電流密度向上に有効であることが示された。

本論文は、ナノ構造を制御したREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>薄膜の超伝導特性評価を行うことにより、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>テープ線材での量子化磁束の挙動および特性決定因子を明らかにしたもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年1月28日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。